



Universidade Federal do Paraná
Setor de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

TMEC121

Introdução a Plasma para Tratamento de Materiais

Noções de tecnologia de vácuo para
plasma a baixa pressão

Prof. Rodrigo Perito Cardoso

Objetivo

- Como a maioria dos processos de tratamento de materiais por plasma se dão a baixa pressão é importante ter noções de tecnologia de vácuo.

O que é vácuo?

- Segundo o dicionário: “*espaço imaginário ou real não ocupado por coisa alguma.*”

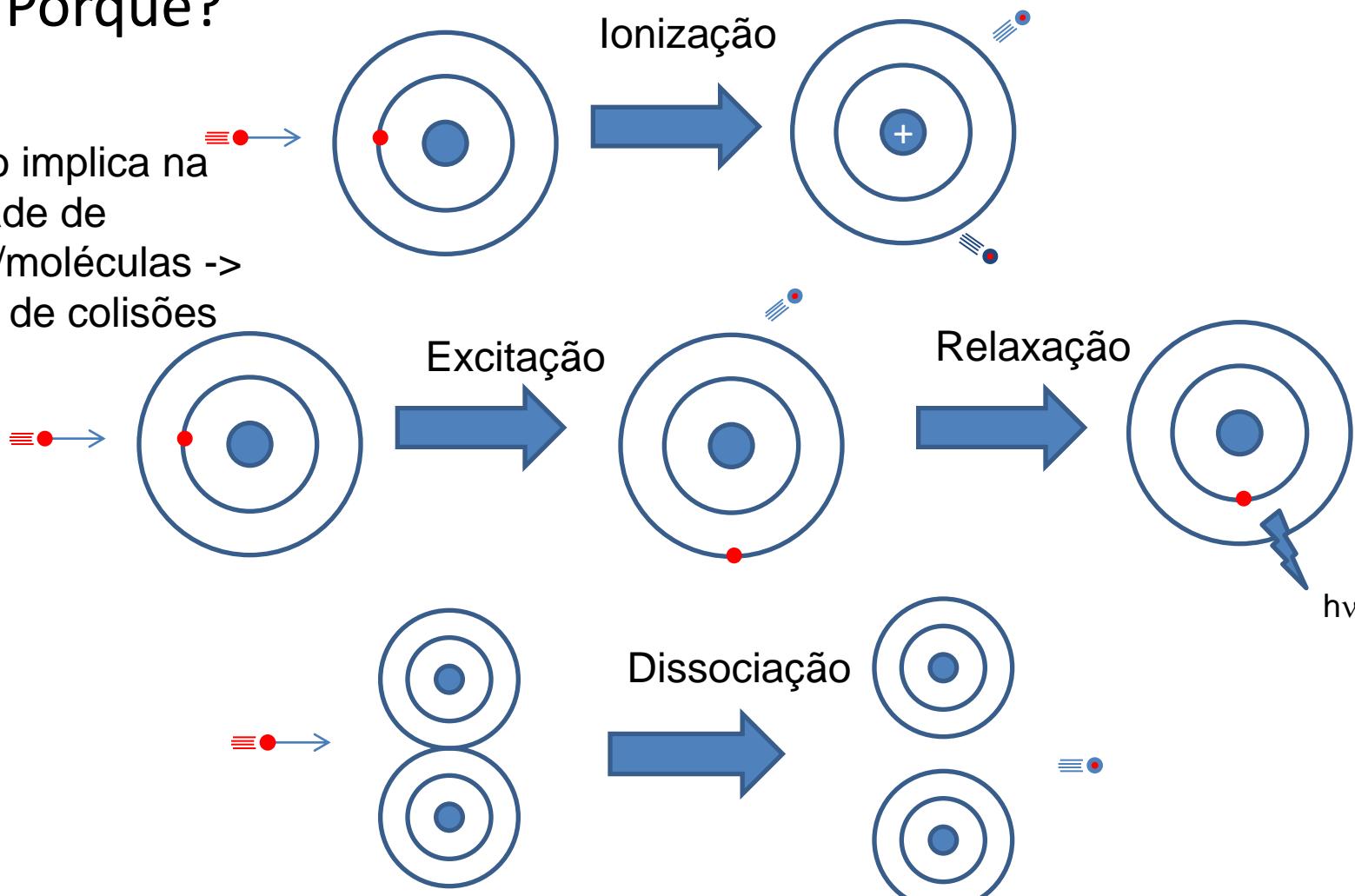
Seria possível obter o vazio absoluto?

Vácuo no sentido tecnológico (aplicado na engenharia): Pressão abaixo da pressão atmosférica

Apresentação

- Porque?

Pressão implica na densidade de átomos/moléculas -> número de colisões

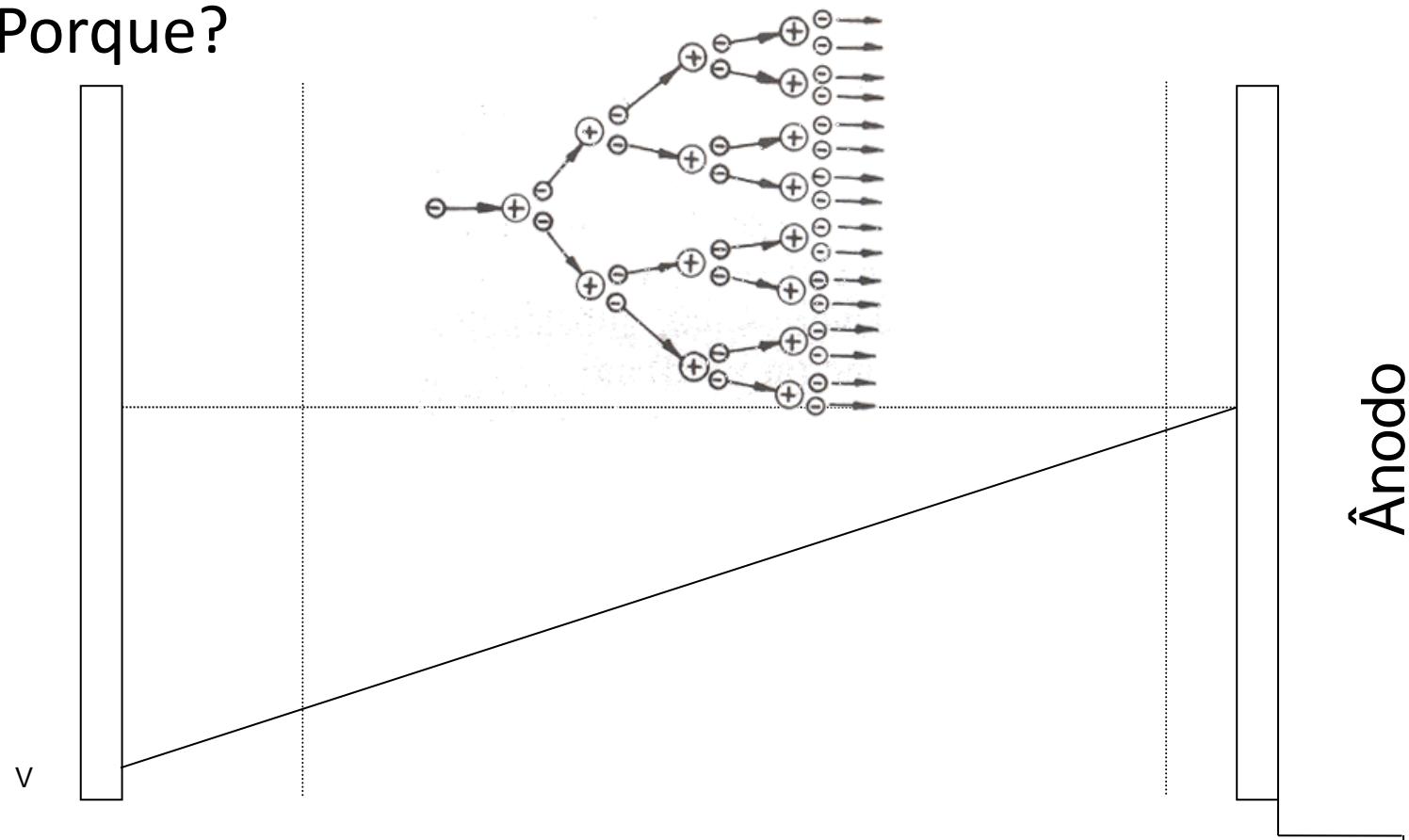


Iniciar e manter a descarga -> gerar espécies ativas (especialmente íons) sem levar a descarga ao regime arco

Apresentação

- Porque?

Cátodo



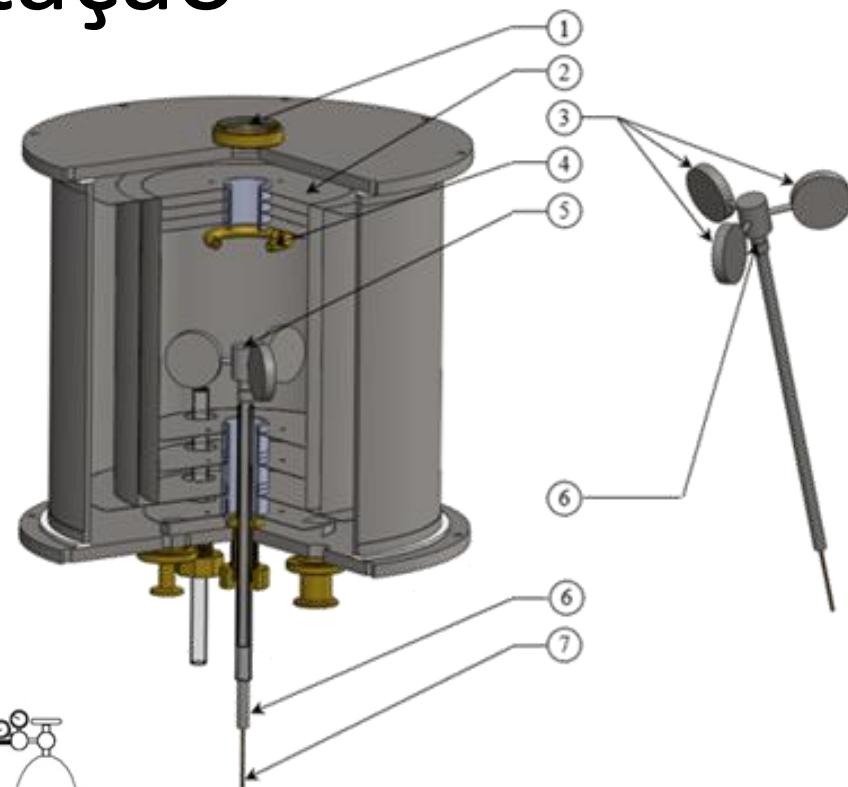
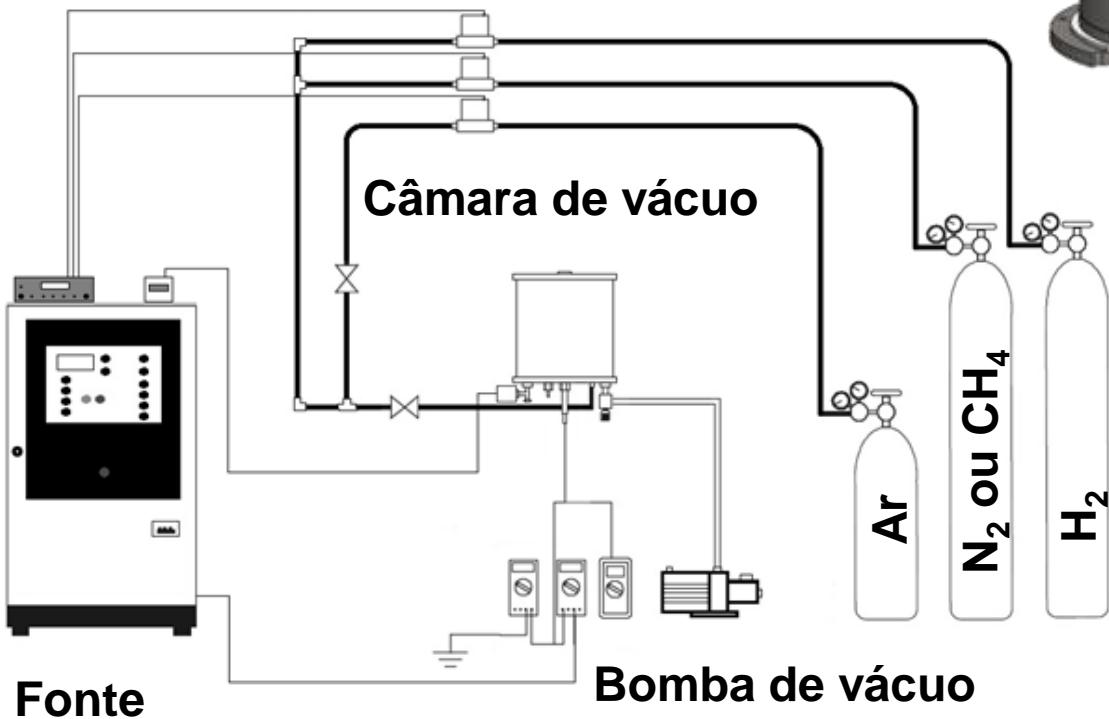
Densidade de átomos/moléculas tem influencia no numero de colisões e
no ganho de energia das espécies carregadas em um campo elétrico
Iniciar (falaremos mais a frente da curva de Paschen) e manter a
descarga (Número de colisões levando a recombinação “desexcitação”)

Apresentação

- Aonde?

Ex. de um sistema de tratamento em plasma DC (Reator de plasma DC para tratamento termoquímico)

Controladores de fluxo



Alguns números

Plasma DC típico (1 a 10 Torr)

Densidade do gás = 3×10^{16} partículas/cm³

Livre caminho médio ~ 5×10^{-3} cm (50μm)

Densidade do eletrônica ~ 10^{11} elétrons/cm³
(energia típica 1eV ≈ 11600K)

Grau de ionização ~ 10^{-5}

1 bar = 750 Torr

1 atm = 760 Torr

1 Torr = 133 Pa

Faixa de Pressão absoluta	Nomenclatura
1 bar - 1 mbar	vácuo grosso; muitas vezes nem é considerado vácuo
$1 - 10^{-3}$ mbar	vácuo fino; tipicamente chamado pré-vácuo (PV)
$10^{-3} - 10^{-7}$ mbar	alto vácuo (HV); muitas vezes a região $10^{-3} - 10^{-4}$ mbar é chamada simplesmente vácuo ou vácuo médio!
abaixo de 10^{-8} mbar	ultra alto vácuo (UHV); tipicamente usada para $\approx 10^{-10}$ mbar

	Pressão Atmosférica	Médio vácuo	Alto vácuo	Ultra alto vácuo	Ultra alto vácuo
Pressão (Torr)	760	10^{-3}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-9}
Número de moléculas por cm ³	2×10^{19}	3×10^{13}	3×10^{10}	3×10^8	3×10^7
Número de moléculas por segundo que bombardeiam as paredes	3×10^{23}	4×10^{17}	4×10^{14}	4×10^{12}	4×10^{11}
Caminho livre médio entre as colisões (cm)	$6,5 \times 10^{-6}$	5	500	5×10^5	5×10^6

Algumas faixas de aplicação

Faixa de Pressão (Torr)	Aplicação
10 a 100	Difícilmente entendido como vácuo. Lasers de nitrogênio, Crescimento de diamante, Indústria de papel, Sugadores
1 a 10	Lasers contíuos de CO ₂ , lasers de He-Ne, Nitretação a plasma
0,1 a 1	Tubos de descarga, lampadas de neônio e fluorescentes, deposição de filmes por Sputtering, Processos CVD e PVD de deposição de filmes
0,01 a 0,1	Lâmpada incandescente, garrafa térmica
10 ⁻³ a 10 ⁻²	z-pinches pulsados para geração de raio-X, garrafas térmicas de boa qualidade
10 ⁻⁴ a 10 ⁻³	espectrografos a vácuo, espectrometro de massa, evaporadora de filmes
10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁴	geradores de raio-X de catodo quente, microscópio eletrônico, tubos de imagem
Abaixo de 10 ⁻⁶	Aceleradores maiores, ciência de superfícies, pesquisa em fenômenos foto-elétricos, filmes de alta pureza

Lei dos gases ideais

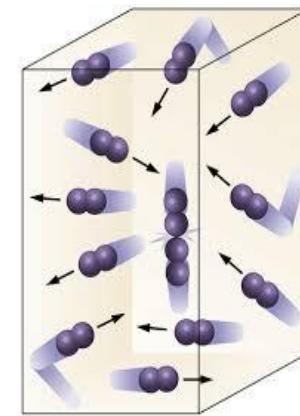
- No vácuo os gases se comportam como gás ideal

$$PV = nRT$$

- Estimativa de vazamento

$$\Delta PV = \Delta nRT$$

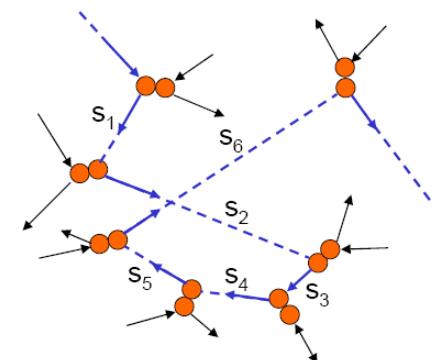
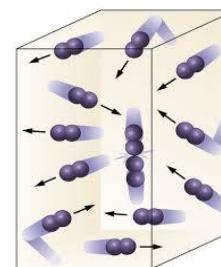
Exercício: Uma câmera de vácuo “fechada” passa de 0,025Torr para 0,035Torr em 10 min. Calcule o vazamento em l/min. (na CNTP)



Em sistemas industriais pode necessitar de um detector de vazamento para localizá-lo

Definições importantes em sistemas de vácuo

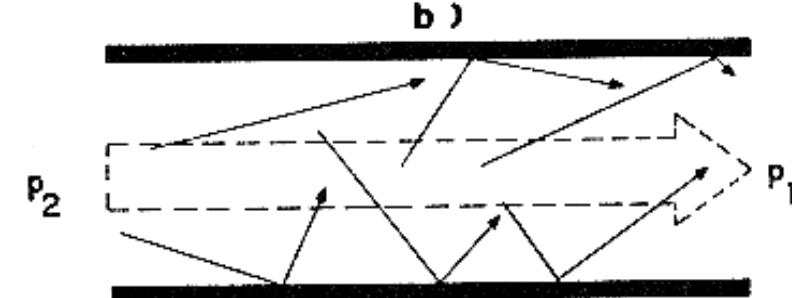
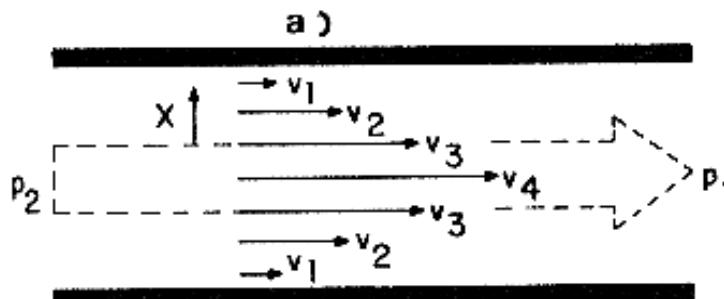
Livre caminho médio (λ): distância percorrida por uma espécie (átomo, molécula ...) entre colisões sucessivas



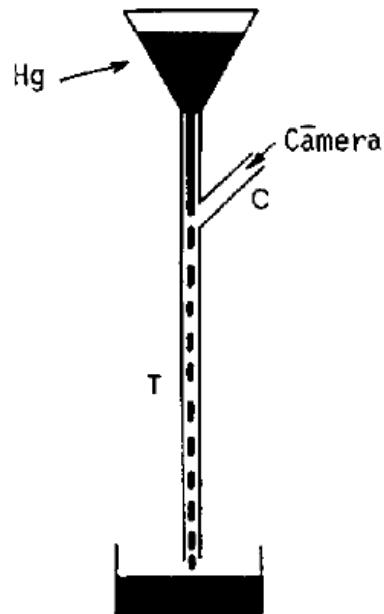
Regimes de fluxo :

- Laminar/viscoso (leis do contínuo) -> $\lambda \ll D$
- Molecular (probabilístico) -> $\lambda \gg D$

D é uma dimensão característica, por exemplo o diâmetro de um duto

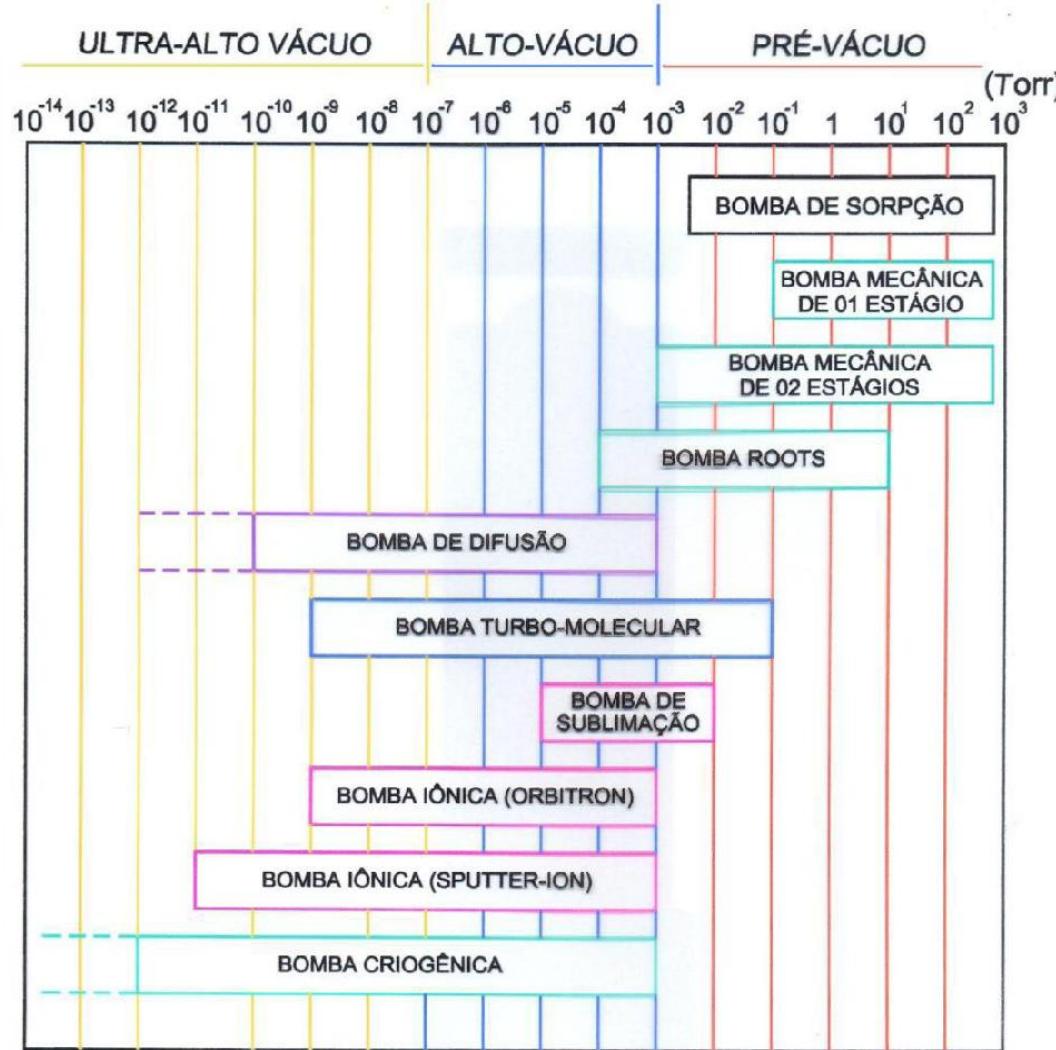


Bombas de vácuo



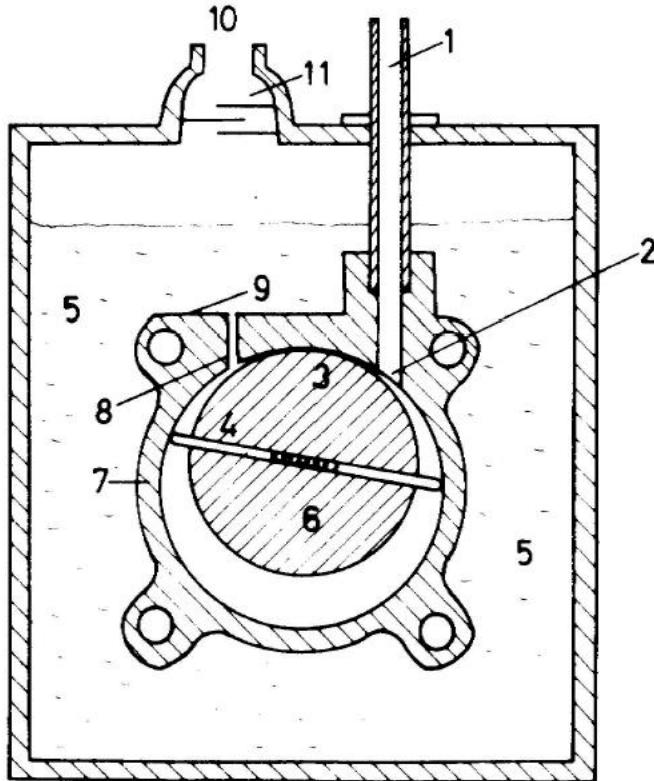
Bomba de Sprengel

Apenas interesse histórico

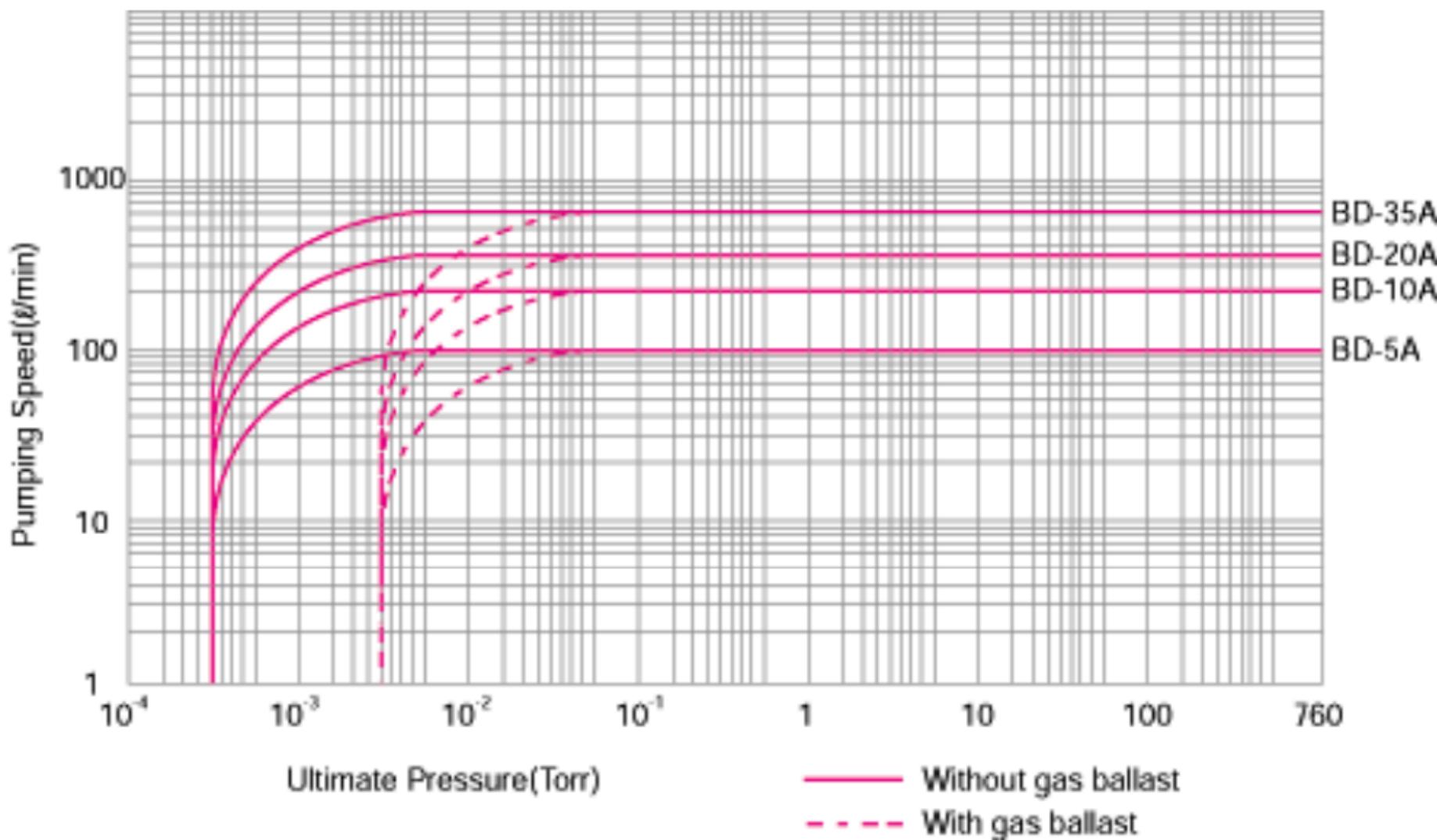


Bombas de vácuo

- Bombas rotativas de palheta ([vídeo](#))



Capacidade de deslocamento
(m^3/h – por ex. na CNTP)



Bombas de vácuo

- Bomba Roots
[vídeo](#)

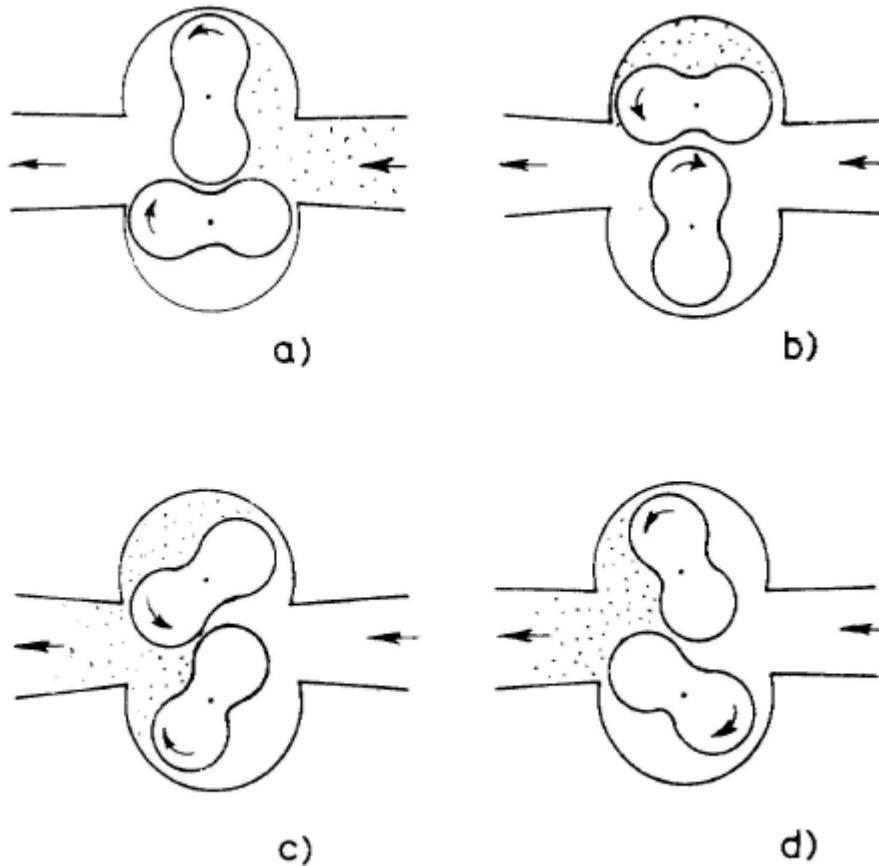


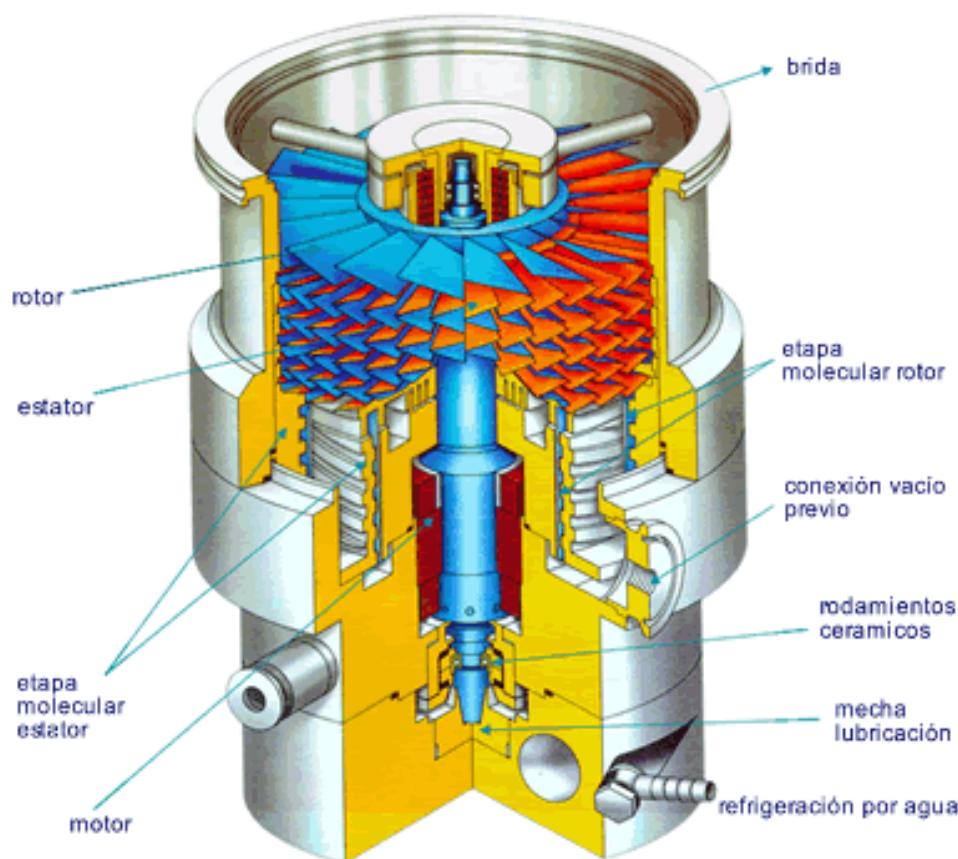
Fig. 6.9: Ação de uma bomba Roots.

Material gratuito em:

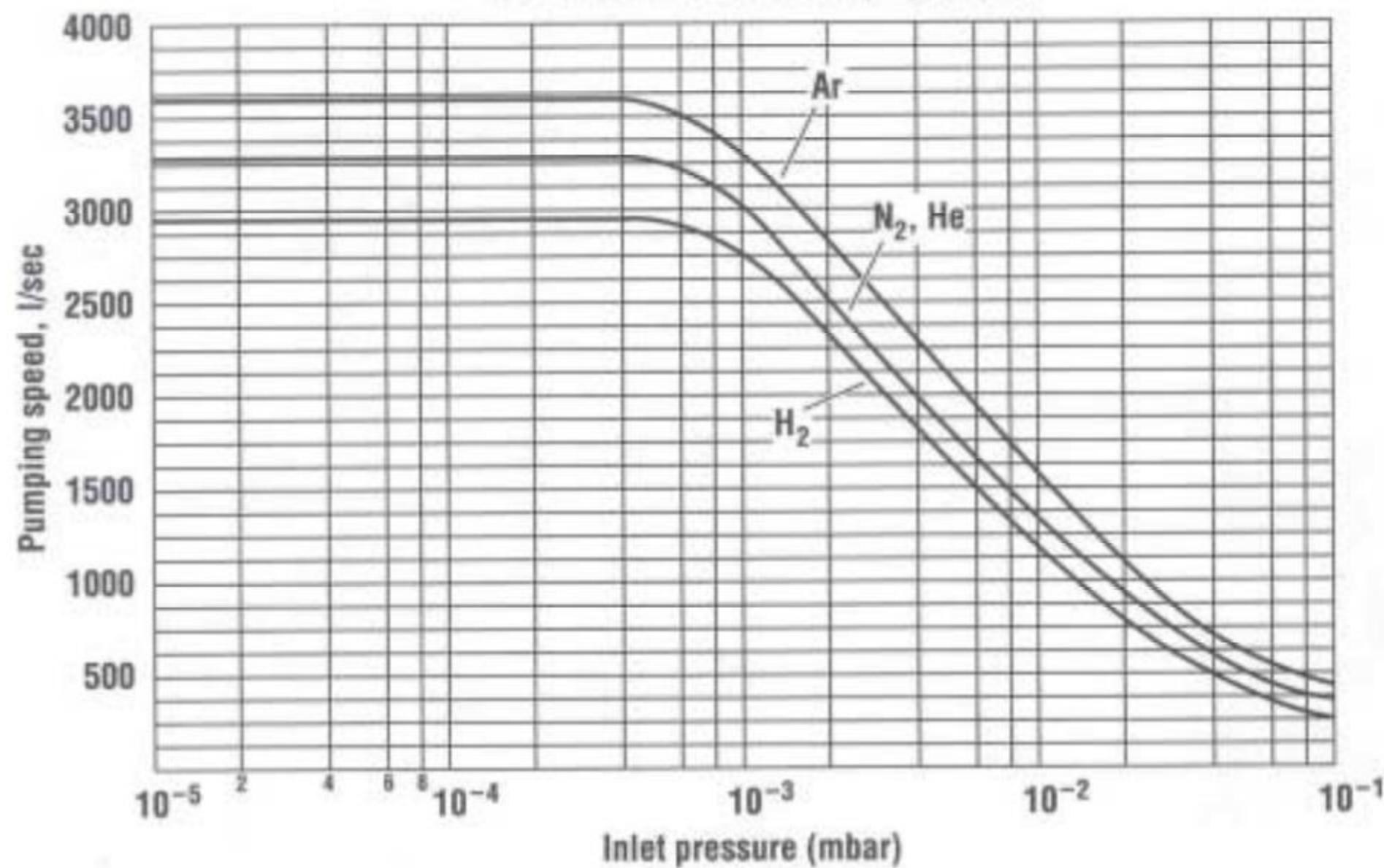
<https://www.leybold.com/en/downloads/download-documents/brochures/>

Bombas de vacío

- Bomba turbomolecular ([vídeo](#))

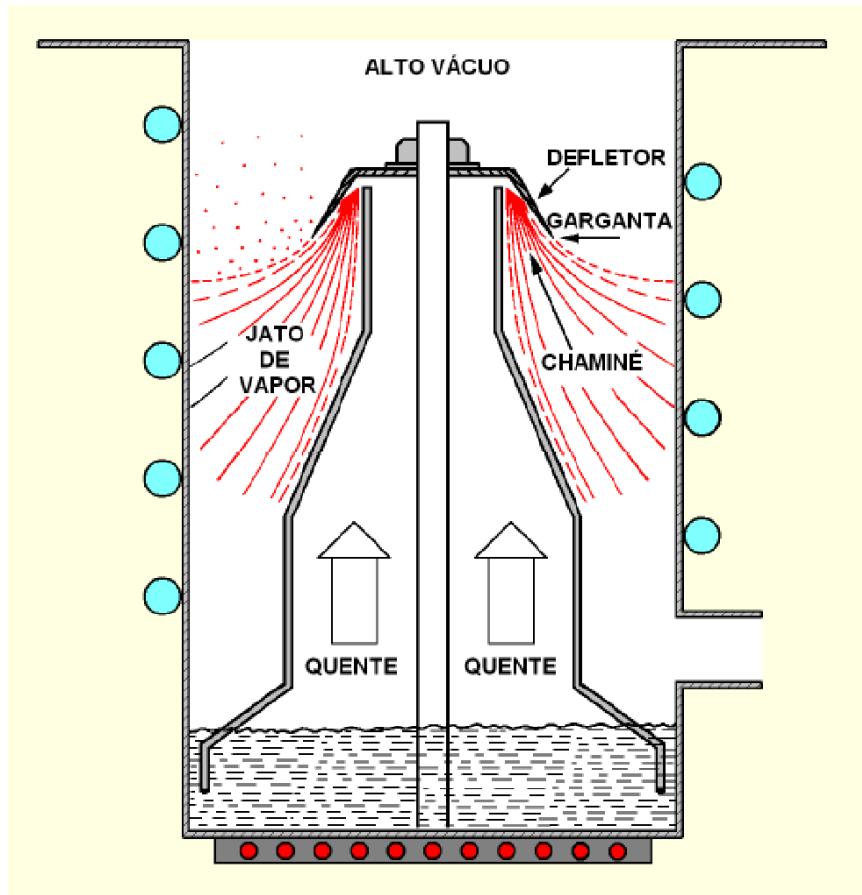


TURBOVAC TMP3500 Pumping speeds



Bombas de vácuo

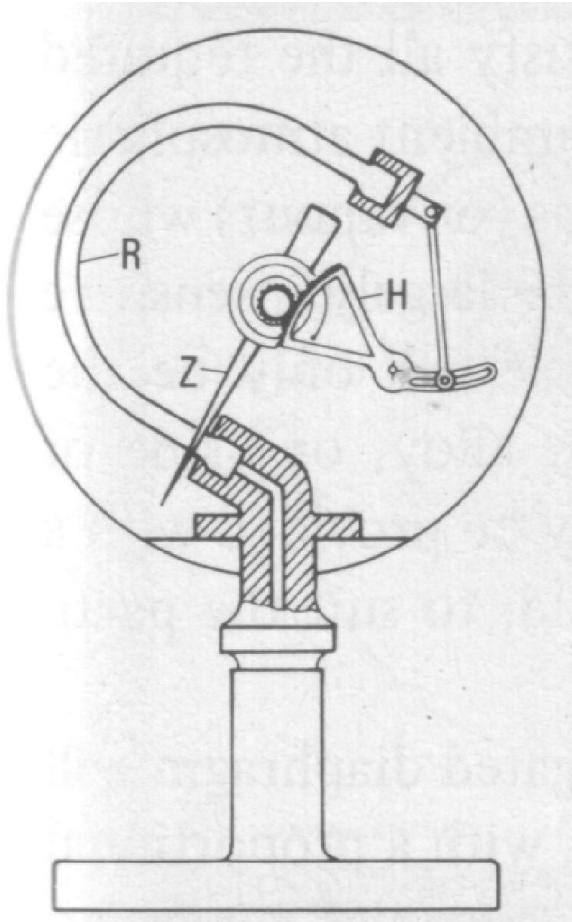
- Bomba difusora



Existem ainda outros tipos de bomba

Medidores de pressão

- **Vacuômetro de Bordon**

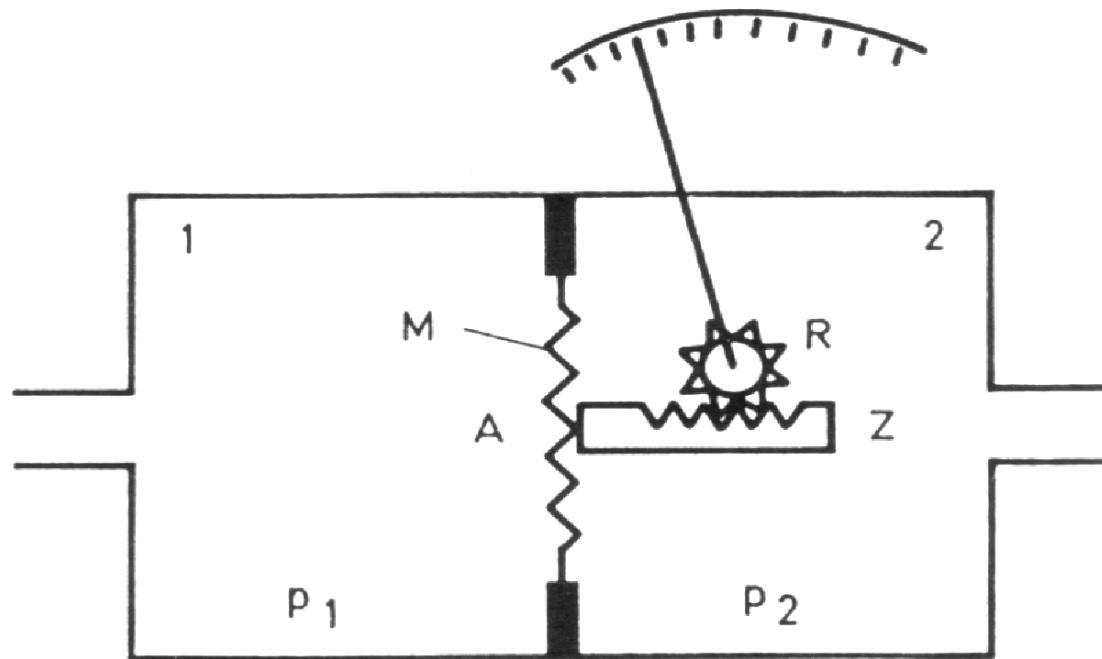


Normalmente mede pressão relativa

Para o funcionamento do plasma o que importa é a pressão absoluta ou a relativa?

Medidores de pressão

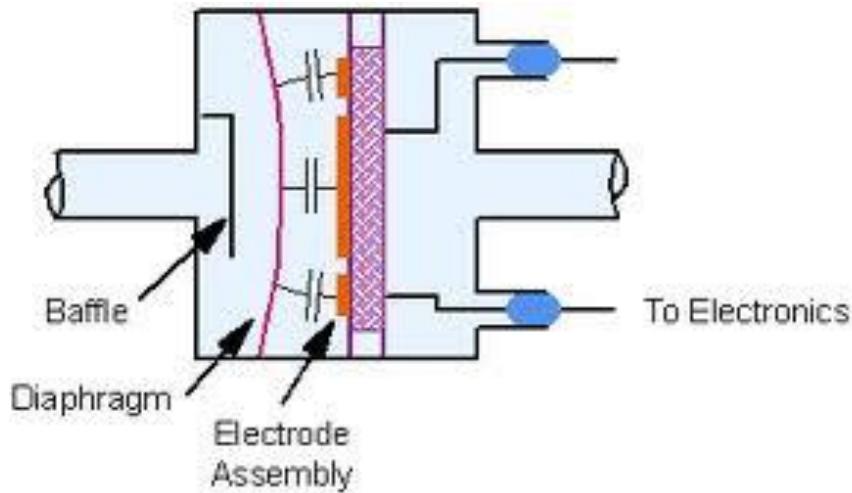
- **Vacuômetro de Membrana**



Pode medir pressão absoluta! Como?

Medidores de pressão

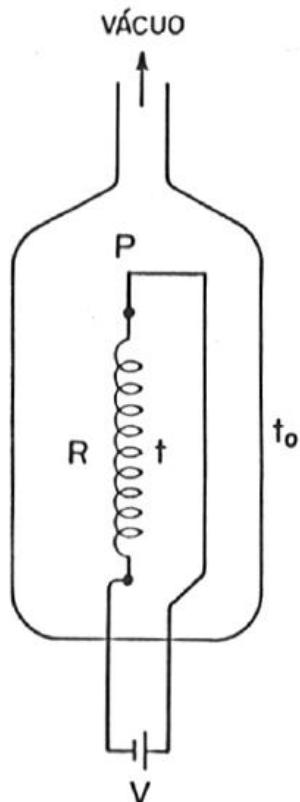
- **Medidores de Membrana Capacitiva – Baratron®**



Normalmente mede pressão absoluta!

Medidores de pressão

- Medidor Pirani



$t = 100 - 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$R = f(P, t_0)$

$R = \text{RESISTÊNCIA DO FILAMENTO}$

$P = \text{PRESSÃO DO SENSOR}$

$t_0 = \text{TEMPERATURA AMBIENTE}$



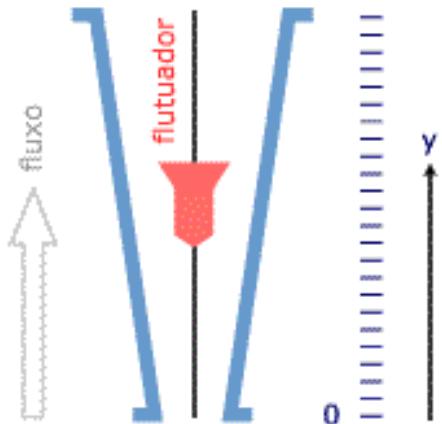
Mede condutividade térmica do gás!

Pressão medida de forma indireta e dependente do gás

Existem ainda outros tipos de medidores de pressão

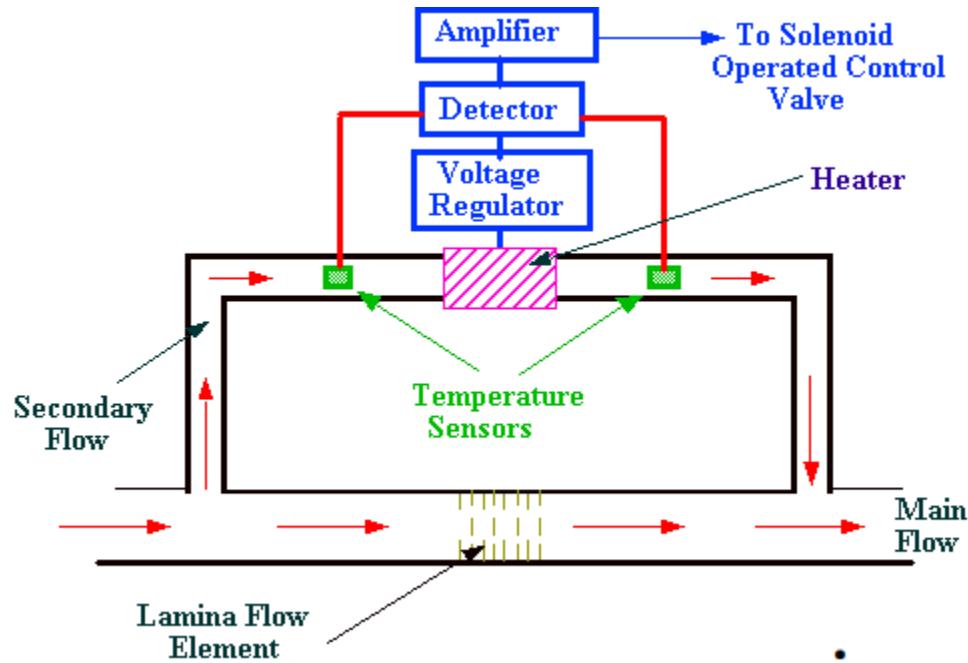
Medidores de vazão

- Rotâmetro

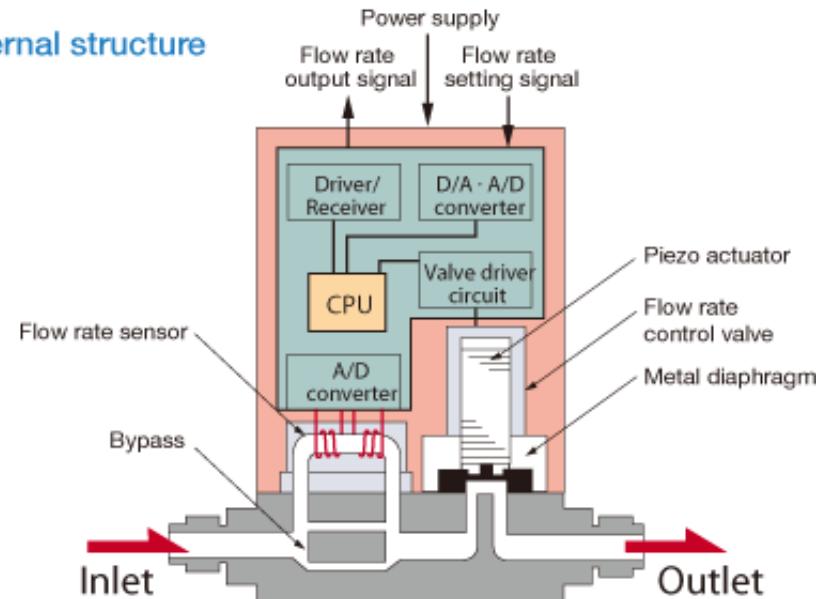


Medidores de vazão

- Fluxímetros mássicos



► Internal structure

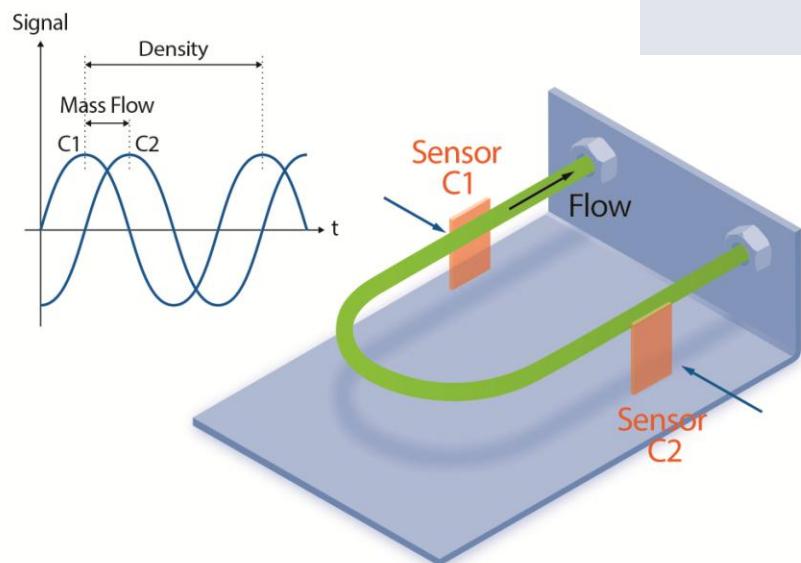
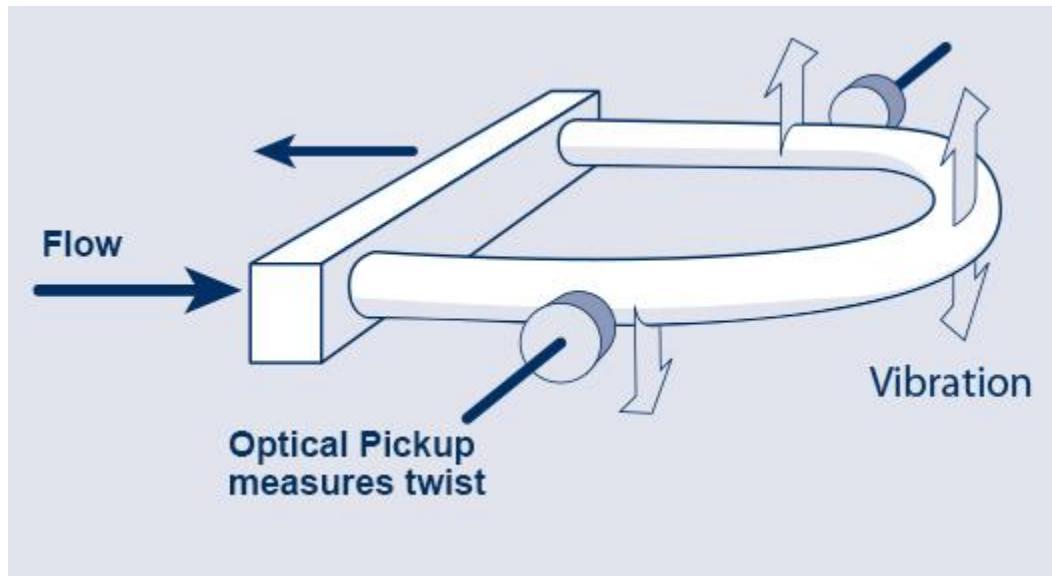


$$\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T$$

Fluxo medido em sccm (cm³/min na CNTP)

Medidores de vazão

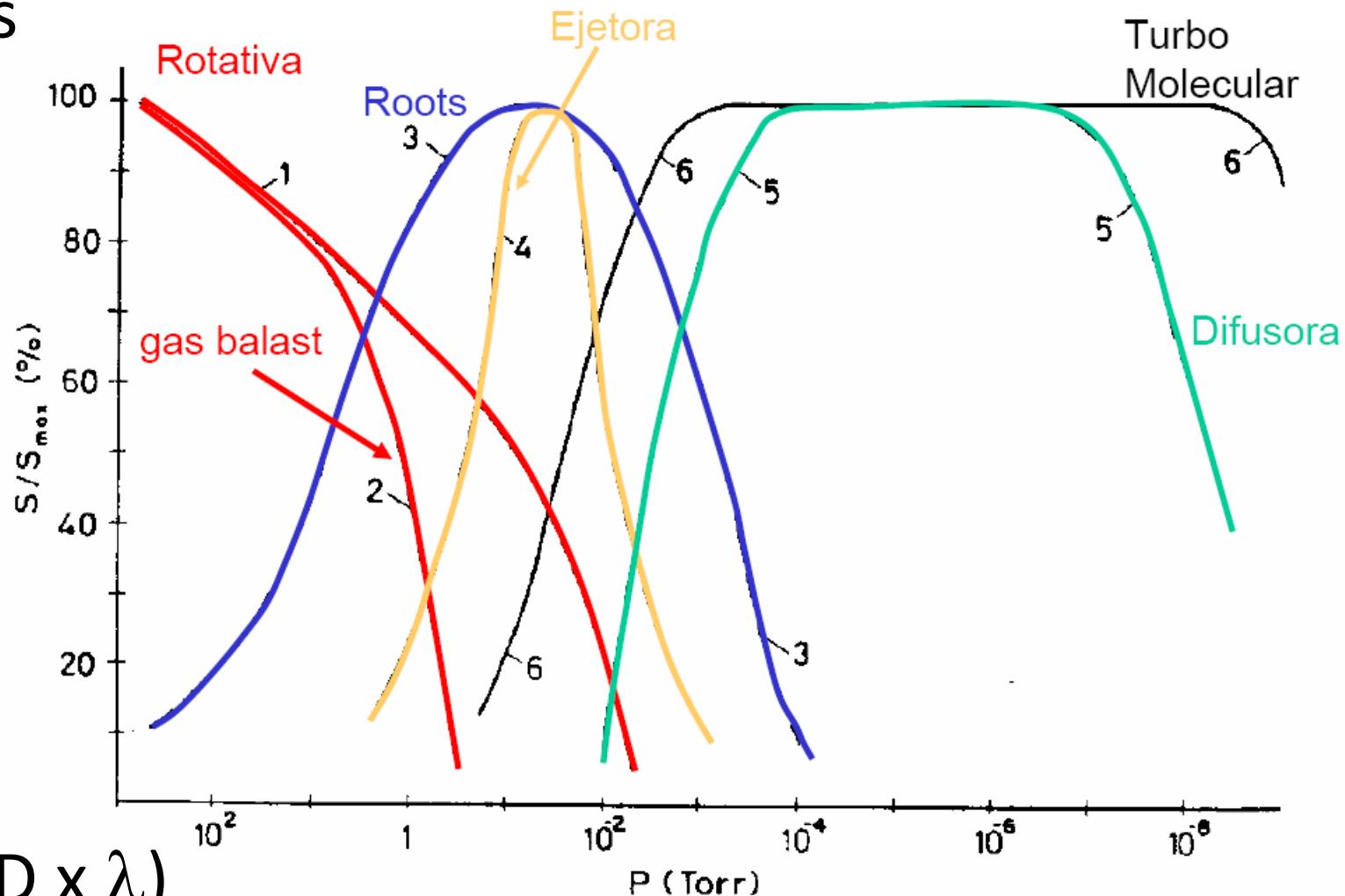
- Coriolis



Existem ainda outros tipos de
medidores de vazão

Dimensionamento

- Bombas



- Dutos ($D \times \lambda$)
- Tempo de residência ($\tau = V/\text{fluxo}$)